

УДК.621.771.01

О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО, Л. В. ПОСТОЛЬНИК**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ
В РЕЖИМЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ**

Результаты экспериментальных исследований, опубликованные в ряде отечественных и зарубежных источников, показывают, что процесс холодной прокатки с применением эффективных технологических смазок совершается устойчиво без частичных пробуксовок при однозонном скольжении металла в валках или даже при «отрицательном» опережении. С позиции современной теории такие условия прокатки трудно объяснить, так как она исходит из того, что предельные условия определяются равенством угла нейтрального сечения нулю.

Поэтому целью настоящей работы является изучение закономерностей процесса прокатки при однозонном скольжении полосы в очаге деформации и в частности исследование распределения контактных напряжений при прокатке в режиме гидродинамического трения. Проведенные нами опыты показывают, что, опережение существенно зависит от толщины смазочной пленки в контакте полосы с валками и при значительной величине ее прокатка протекает в условиях однозонного скольжения. Поэтому в теоретическом исследовании исходили из гидродинамического закона трения в очаге деформации. Учитывая, что закон Баруса не отражает реальной картины изменения вязкости смазки от давления из-за возможности перехода ее в твердое фазовое состояние, пришлось несколько изменить принятую модель. При этом исходили из равенства полных сил гидродинамического трения и трения скольжения. Подставляя эту модель в дифференциальное уравнение Кармана и решая его при известных граничных условиях рассчитывали эпюры контактных напряжений для трех случаев прокатки: при наличии опережения, при нулевом его значении и при однозонном скольжении металла в валках. В первом случае эпюры контактных напряжений существенно от известных не отличались. При прокатке с нулевым опережением кривая распределения нормального давления расположена существенно ниже по сравнению с первым случаем, но ни в одном сечении давление не было ниже среднего сопротивления деформации металла, что свидетельствовало об отсутствии нормальных продольных растягивающих напряжений. При прокатке с «отрицательным» опережением вблизи выхода металла из валков возникают вышеуказанные напряжения. Проверка на продольную устойчивость показала, что во всех трех случаях процесс совершается устойчиво без частичных пробуксовок. Важно отметить, что прокатка при нулевом опережении является энергетически выгодным процессом.

Ключевые слова: опережение, очаг деформации, трение, внутренние продольные силы, продольная устойчивость.

О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО, Л. В. ПОСТОЛЬНИК**ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ПРОКАТУВАННІ
В РЕЖИМІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТЕРТЯ**

Результати експериментальних досліджень, які опубліковані в ряді вітчизняних і зарубіжних джерел, показують, що процес холодного прокатування із застосуванням ефективних технологічних мастил відбувається стійко без часткових буксувань при однозонному ковзанні металу в валках або навіть при «від'ємному» випередженні. З позиції сучасної теорії такі умови прокатування важко пояснити, так як вона виходить з того, що граничні умови визначаються рівністю нулю кута нейтрального перетину.

Тому метою цієї роботи є вивчення закономірностей процесу прокатування при однозонному ковзанні штаби в осередку деформації і зокрема дослідження розподілу контактних напружень при прокатуванні в режимі гідродинамічного тертя. Проведені нами досліді показують, що, випередження істотно залежить від товщини мастильної плівки в контакті штаби з валками і при значній величині її прокатування протікає в умовах однозонного ковзання. Тому в теоретичному дослідженні виходили з гідродинамічного закону тертя в осередку деформації. Враховуючи, що закон Баруса не відображає реальної картини зміни в'язкості мастила від тиску через можливість переходу її в твердий фазовий стан, довелося дещо змінити прийняту модель. При цьому виходили з рівності повних сил гідродинамічного тертя і тертя ковзання. Підставляючи цю модель в диференціальне рівняння Кармана і вирішуючи його при відомих граничних умовах розраховували епюри контактних напружень для трьох випадків прокатування: при наявності випередження, при нульовому його значенні і при однозонному ковзанні металу в валках. У першому випадку епюри контактних напружень істотно від відомих не відрізнялися. При прокатуванні з нульовим випередженням крива розподілу нормального тиску розташована істотно нижче в порівнянні з першим випадком, але ні в одному перерізі тиск не був нижче за середній опір деформації металу, що свідчило про відсутність нормальних поздовжніх напружень, що розтягують. При прокатуванні з «від'ємним» випередженням поблизу виходу металу з валків виникають вищевказані напруження. Перевірка на поздовжню стійкість показала, що у всіх трьох випадках відбувається стійко без часткових буксувань. Важливо відзначити, що прокатування при нульовому випередженні є енергетично вигідним процесом.

Ключові слова: випередження, осередок деформації, тертя, внутрішні поздовжні сили, поздовжня стійкість.

О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО, Л. В. ПОСТОЛЬНИК**INVESTIGATION OF CONTACT STRESSES WHILE ROLLING IN HYDRODYNAMIC FRICTION**

The results of experimental studies published in a number of domestic and foreign sources show that the cold rolling process using effective process lubricants is stable without partial slippage during single-zone sliding of metal in the rolls or even with a "reverse" forward slip. From the point of view of modern theory, such rolling conditions are difficult to explain, so how does it proceed from the fact that the limiting conditions are determined by the equality of the angle of the neutral cross section to zero.

Therefore, the aim of this work is to study the patterns of the rolling process during single-zone strip sliding in the deformation zone and, in particular, to study the distribution of contact stresses during rolling in the hydrodynamic friction mode. Our experiments show that, advancing essentially depends on the thickness of the lubricating film in contact with the strip and the rolls when a significant value of its rolling occurs in single-zone sliding. Therefore, in a theoretical study, we proceeded from the hydrodynamic law of friction in the deformation zone. Given that the Barus law does not reflect the real picture of changes in the viscosity of the lubricant from pressure due to the possibility of its transition to a solid phase state, it was necessary to slightly change the adopted model. In this case, we proceeded from the equality of the total forces of hydrodynamic friction and sliding friction. Substituting this model into the Karman differential equation and solving it under known boundary conditions, contact stress diagrams were calculated for three rolling cases: in the presence of forward slip, at its zero value and with single-zone metal slip in the rolls. In the first case, the contact stress diagrams did not differ significantly from the known ones. When rolling with zero forward slip, the normal pressure distribution curve is significantly lower compared to the first case, but for one section the pressure was not lower than the average metal deformation resistance, which indicated the absence of normal longitudinal tensile stresses. When rolling with a "negative" of forward slip near the exit of the metal from the rolls, the above stresses occur. A check for longitudinal stability showed that in all three cases the process is performed stably without partial slippage. It is important to note that rolling at zero forward slip is an energetically profitable process.

Keywords: forward slip, deformation zone, friction, internal longitudinal forces, longitudinal stability.

Введение. Экспериментальные исследования, возможность осуществления устойчивого процесса прокатки с технологической смазкой при приведенные в работах [1, 2 и др.], показывают

однозонном скольжении металла в валках или даже с «отрицательным» опережением. В этом случае, теоретически установленное, предельное условие прокатки $\gamma = 0$ (γ – нейтральный угол) не выполняется.

Исследователи объясняют устойчивость такого процесса особенностями трения в очаге деформации, связанными с зависимостью коэффициента трения от скорости скольжения, предполагая, что в этом контакте соблюдается закон Ньютона. Заметим что гидродинамический режим трения возможен не только при $R_{ЗБ} + R_{ЗП} < \xi_1$ ($R_{ЗБ}$ и $R_{ЗП}$ – средняя высота микронеровностей валка и полосы; ξ_1 – толщина слоя смазки на выходе из очага деформации), но и при равенстве приведенных выше величин или даже в тех случаях, когда сумма микронеровностей несколько превышает значение ξ_1 [3].

Постановка задачи. С целью более детального изучения закономерностей прокатки при однозонном скольжении металла в валках проанализируем изменение контактных напряжений в условиях жидкостного трения при тяжело нагруженном контакте. Механики такой режим называют контактно-гидродинамическим [4]. Он определяется зависимостью динамической вязкости смазки от давления и влиянием упругой деформации полосы и валков в гидродинамическом клине, расположенном в предочаговой зоне, на толщину слоя смазки.

Результаты работы. Предварительно обратим внимание на то, что переход к однозонному скольжению зависит от толщины слоя смазки в очаге деформации. В связи с отмеченным приведем результаты эксперимента, в котором исследовали влияние угла захвата на опережение и толщину смазочной пленки. Опыты проводили на лабораторном стане дуо в полированных валках диаметром 190 мм при скорости прокатки $V_b = 0,35$ м/с, образцами служили медные полосы поперечными разрезами $h_0 \times b_0 = 5 \times 60$ мм. В качестве технологической смазки применяли касторовое масло. Толщину смазочной пленки в контакте валков и полосы измеряли капельным методом [5], опережение S определяли по керновым отпечаткам. Результаты опытов приведены на рис. 1.

Как видно, при значительной толщине слоя смазки ($\xi_1 \geq 1,2$ мкм) процесс прокатки совершается устойчиво без частичных пробуксовок при однозонном скольжении металла в валках ($S < 0$). Казалось бы, при опережении равно нулю запас сил трения исчерпан и дальнейшее увеличение угла захвата должно привести к нарушению равновесия сил в очаге деформации и к пробуксовке полосы в валках. Однако с увеличением α возрастает скольжение металла в валках и уменьшается толщина смазочной пленки в очаге деформации, что в соответствии с законом Ньютона, приводит к росту сил трения в контакте металла с валками и стабилизации процесса

прокатки, но при $S < 0$. Поэтому при холодной прокатке с эффективными (вязкими) технологическими смазками, при значительной толщине масляной пленки возможен процесс с однозонным скольжением.

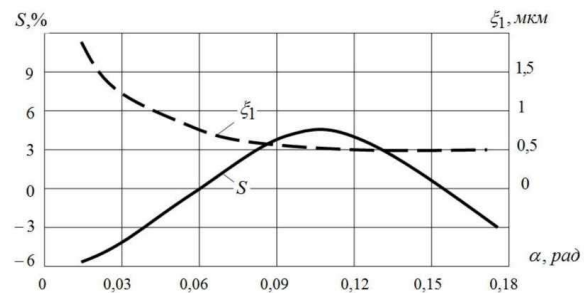


Рис. 1 – Зависимость толщины смазочной пленки и опережения от угла захвата

Закон Баруса [6-8] не отражает реальной картины изменения вязкости смазки при высоких давлениях в очаге деформации из-за возможности ее перехода в твердое фазовое состояние. Поэтому при теоретическом анализе пришлось усреднить значение динамической вязкости, предполагая, что полные силы гидродинамического трения и трения скольжения равны между собой. Тогда:

$$\eta_{\text{ср}} \frac{v_{\text{ск.ср.}}}{\xi_{\text{ср}}} F = f_{\text{ср}} p_{\text{ср}} F, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ср}}$ – среднее по очагу деформации значение динамической вязкости;

$v_{\text{ск.ср.}}$ – средняя скорость скольжения по очагу; $\xi_{\text{ср}}$ – средняя толщина смазочной пленки;

$f_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента трения при установившемся процессе прокатки;

$p_{\text{ср}}$ – среднее давление по очагу деформации;

F – площадь контакта металла с валками.

В этом случае гидродинамическая модель трения в очаге деформации приобретает вид:

$$t_x = \frac{f_{\text{ср}} p_{\text{ср}} \xi_{\text{ср}}}{v_{\text{ск.ср.}}} \cdot \frac{v_b - v_x}{\xi_x}. \quad (2)$$

где v_x – текущее значение скорости поверхности раската;

v_b – линейная скорость вращения валка;

ξ_x – текущее значение толщины слоя смазки.

Учитывая, что толщина слоя смазки в реальных условиях холодной прокатки слабо изменяется по очагу деформации, в первом приближении можем принять $\xi_x \approx \xi_{\text{ср}}$. Тогда, модель трения принимает вид:

$$t_x = \frac{f_{\text{ср}} p_{\text{ср}}}{v_{\text{ск.ср.}}} \cdot (v_b - v_x). \quad (3)$$

Заметим, что среднее значение скорости скольжения определяли по известной формуле:

$$v_{\text{ск.ср.}} = \frac{v_b \cdot \Delta h}{3 \cdot h_1}.$$

Подставляя выражение (3) в дифференциальное уравнение равновесия Т. Кармана и решив его при известном граничном условии на входе в очаг деформации, получаем уравнение распределения давления в безразмерном виде:

$$\frac{p_x}{\beta \sigma_x} = 1 + \ln \frac{h_x}{h_0} - A \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left\{ (1-S) \left[\arctg \sqrt{\frac{h_x - h_1}{h_1}} - \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right] - (S+1) \left[\sqrt{\frac{(h_x - h_1) h_1}{h_x}} - \frac{\sqrt{\Delta h \cdot h_1}}{h_0} \right] \right\}. \quad (4)$$

$$A = \frac{f_{\text{ср}} p_{\text{ср}} 3 h_1}{\beta \sigma_{\tau} \Delta h}$$

где h_0 ; h_1 и h_x – начальное и конечное значение толщины полосы, а также его текущее значение;

R – радиус валков;

S – опережение;

Δh – абсолютное обжатие полосы;

$\beta \sigma_{\tau}$ – вынужденный предел текучести.

Граничное условие на выходе полосы из валков используем для расчета опережения:

$$S = \frac{\arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \sqrt{\frac{\Delta h \cdot h_1}{h_0}} - \frac{1}{A} \sqrt{\frac{h_1}{R}} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}}{\arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \sqrt{\frac{\Delta h \cdot h_1}{h_0}}}. \quad (5)$$

Определяя по известным формулам [9, 10 и др.] значение $f_{\text{ср}}$, из выражения (5) находили опережение S и рассчитывали эпюры контактных напряжений. Требуемые значения A определяли с использованием метода последовательных приближений. На рис. 2 приведены эпюры контактных напряжений для трех случаев прокатки: при наличии опережения $S = 4,1\%$, при нулевом его значении и при однозонном скольжении металла в валках ($S = -1,8\%$). Моделирование указанных случаев прокатки

обеспечивали изменением коэффициента трения ($f_{\text{ср}} = 0,0585$; $0,0323$; и $0,0281$) и соответственно при следующих значениях $v_{\text{ср.ск.}}/V_B$: $0,082$; $0,098$ и $0,106$. Остальные параметры прокатки удерживали на постоянном уровне: $h_0/h_1 = 1,245$; $\alpha = 0,047$ рад; $R/h_0 = 89,9$.

При коэффициенте трения несколько превышающем угол захвата получены эпюры контактных напряжений характерные для обычного процесса (кривые 1): куполообразное распределение давления с максимумом, несколько смещённым к плоскости входа металла в валки относительно нейтрального сечения. В очаге деформации имеет место развитая зона опережения. При $f_{\text{ср}} = 0,0323$, когда опережение равно нулю, кривая нормального давления (линия 2) расположена существенно ниже по сравнению с предыдущей. Максимум этой эпюры еще более смещен к плоскости входа в очаг деформации, а удельные силы трения принимают нулевое значение в сечении выхода металла из валков. Важно отметить, что по всей длине очага деформации безразмерное давление $\frac{p_x}{\beta \sigma_{\tau}} \geq 1$. Последнее свидетельствует о том,

что при прокатке с нулевым опережением и гидродинамическом режиме трения в зоне пластической деформации продольные нормальные напряжения σ_x являются сжимающими. При прокатке с «отрицательным» опережением ($f_{\text{ср}} = 0,0281$, кривые 3) вблизи выхода металла из валков эти напряжения становятся растягивающими, а отношение $\frac{p_x}{\beta \sigma_{\tau}} < 1$. Заметим, что во всех приведенных на рис. 2 случаях прокатки относительное безразмерное среднее давление $\frac{p_{\text{ср}}}{\beta \sigma_{\tau}}$

больше единицы. Последнее связано с тем, что при рассматриваемых условиях трения разность напряжений на значительной части входной зоны является положительной (рис. 3).

$$q_x = \frac{t_x \cos \varphi - p_x \sin \varphi}{\beta \sigma_{\tau}}. \quad (6)$$

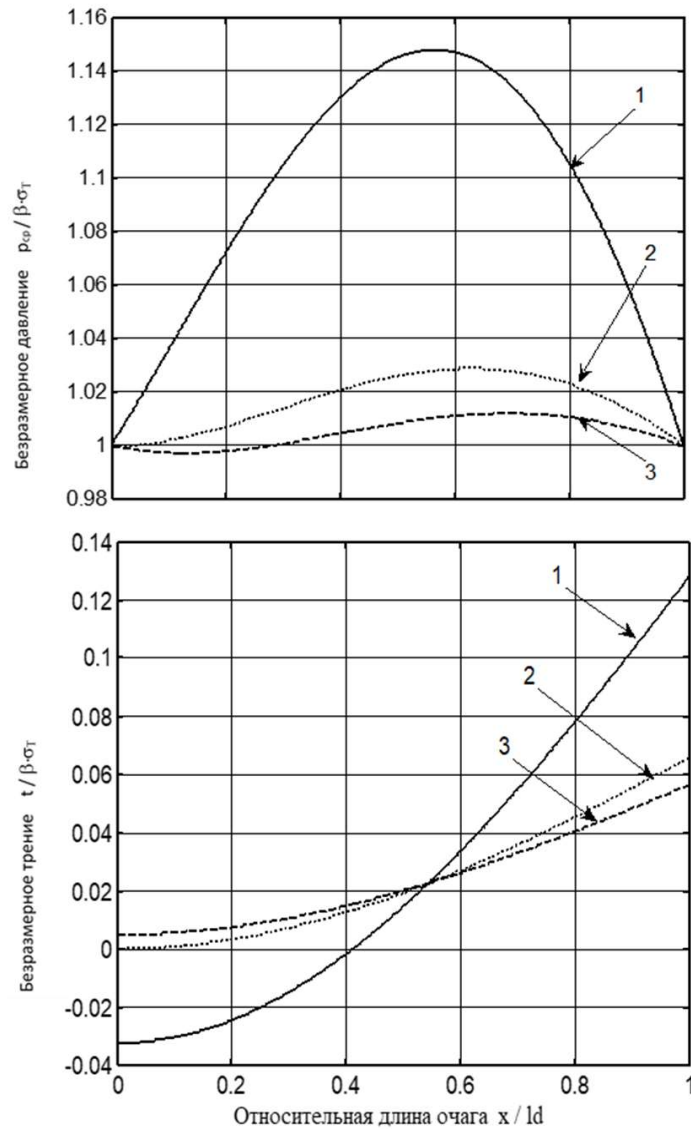


Рис. 2. Распределение безразмерных давления и удельных сил трения по длине очага деформации

При этом в случае прокатки с нулевым опережением результирующая между вытягивающими и выталкивающими силами $Q_\varphi = \int_\varphi^\alpha q_x d\varphi$ (рис. 3, текущая площадь под кривой 1) остаётся положительной вплоть до сечения выхода металла из валков, в котором она принимает нулевое значение.

При прокатке с отрицательным опережением эта результирующая (рис. 3, текущая площадь под кривой 2) по длине контактной зоны меняет свой знак. Будучи положительной в сечениях вблизи плоскости входа, в центральной части очага деформации уменьшается и становится отрицательной. Ближе к сечению выхода из очага деформации эта сила вновь становится положительной. Анализ кривых изменения результирующей Q_φ позволяет объяснить причину устойчивости процесса прокатки с отрицательным

опережением при гидродинамическом режиме трения. Это связано с тем, что результирующая вытягивающих и выталкивающих сил Q_φ на значительной части входной зоны очага деформации направлена по ходу прокатки в отличие от ее направления при кулоновском трении, что и обеспечивает устойчивый процесс прокатки при однозонном скольжении металла в валках.

Следует также подчеркнуть, что при однозонном скольжении полосы в очаге деформации отсутствует подпирающее действие удельных сил трения, что приводит к существенному снижению давления металла на валки, уменьшению усилия прокатки и других энергосиловых параметров. Поэтому прокатка в указанных условиях является энергетически выгодным процессом.

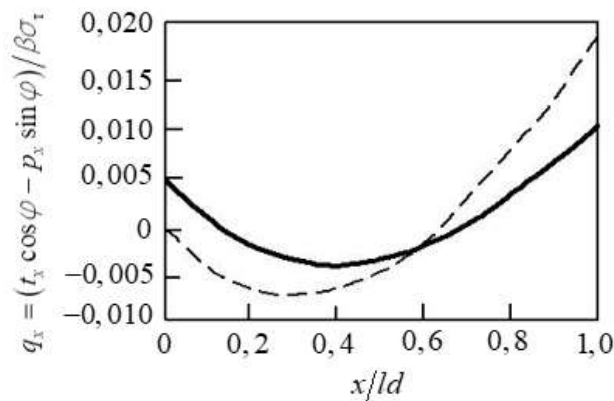


Рис. 3. Распределение безразмерной разности горизонтальных проекций напряжений давления и трения по очагу деформации

Выводы. Разработана методика расчета контактных напряжений при гидродинамическом режиме трения в контакте полосы с валками. Теоретически доказано, что процесс прокатки с эффективными технологическими смазками может совершаться устойчиво без частичных пробуксовок при однозонном скольжении металла в очаге деформации. Этому способствует толщина слоя смазки в контакте валков и полосы. Прокатка при нулевом опережении является энергетически выгодным процессом.

Список литературы

- Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков. М. : СП Интернет Инжиниринг, 1998. 283 с.
- Павлов И. М., Белосевич В. К. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке. Изв. вузов. Черная металлургия. 1964. № 9. С. 106–112.
- Максименко О. П., Лейко О. Е. О переходе к режиму жидкостного трения при тонкопленочной смазке в условиях прокатки. Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. № 10. С. 12–16.
- Коднир Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М. : Машиностроение, 1976. 304 с.
- Грудев А. П. Теория прокатки. М. : Металлургия, 1988. 240 с.
- Петрусович А. И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. Известия АН СССР, ОНТ. 1951. № 2. С. 209–223.
- Mizuno T. An experimental research on cold rolling. 1. Report. Estimating the mechanism of the lubrication. Japan Society of Technology of Plasticity. 1966. № 7. P. 383–389.
- Максименко О. П., Лясота С. М., Романюк Р. Я. Теорія процесів прокатного, трубного, ковально-штампувального та волочильного виробництва : навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДГТУ, 2011. 264 с.
- Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке. М. : Металлургия, 1973. 288 с.
- Николаев В. А. Теория и практика процессов прокатки. Запорожье: ЗГИА, 2002. 300 с.

References (transliterated)

- Grudev A. P. Zakhvatyvayushchaya sposobnost prokatnykh valkov. Moscow: SP Internet Inzhiniring, 1998. 283 p.
- Pavlov I. M., Belosevich V. K. K voprosu ob otritsatel'nom operezhenii pri prokatke. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. 1964. No 9. pp. 106–112.
- Maksimenko O. P., Leyko O. E. O perehode k rezhimu zhidkostnogo treniya pri tonkoplenochnoy smazke v usloviyakh prokatki. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. 2003. – No 10. – pp. 12–16.
- Kodnir D. S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detaley mashin. Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 304 p.
- Grudev A. P. Teoriya prokatki/ Moscow: Metallurgiya, 1988. – 240 p.
- Petrusevich A. I. Osnovnyie vyivodyi iz kontaktno-gidrodinamicheskoy teorii smazki. Izvestiya AN SSSR, ONT. 1951. No 2. pp. 209–223.
- Mizuno T. An experimental research on cold rolling. 1. Report. Estimating the mechanism of the lubrication. Japan Society of Technology of Plasticity. 1966. No 7. pp. 383–389.
- Maksimenko O. P., Lyasota S.M., Romanyuk R.Ya. Teoriya protsesiv prokatnogo, trubnogo, kovalsko-shtampuval'nogo ta volochil'nogo virobnitstva: navchalniy posibnik. Dniproderzhinsk: DGTU, 2011. – 264 p.
- Grudev A. P. Vneshnee trenie pri prokatke. Moscow: Metallurgiya, 1973. – 288 p.
- Nikolaev V. A. Teoriya i praktika protsessov prokatki. Zaporozhe: ZGIA, 2002. – 300 p.

Поступила (received) 01.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Максименко Олег Павлович (Максименко Олег Павлович, Maksimenko Oleg Pavlovich) – доктор технічних наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, завідувач кафедри обробки металів тиском; м. Кам'янське, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0846-9869>; e-mail: O.maks1940@gmail.com

Лобойко Дар'я Ігорівна (Лобойко Дарья Игоревна, Loboiko Daria Igorevna) – Дніпровський державний технічний університет, асистент кафедри обробки металів тиском; м. Кам'янське, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9223-0329>; e-mail: darloboiko@gmail.com

Постольник Лілія Василівна (Постольник Лилия Васильевна, Postolnyk Liliia Vasylivna) – Дніпровський державний технічний університет, студентка; м. Кам'янське, Україна